

طراحی ساختار مناسب ترانسفورماتور الکترونیک قدرت بر مبنای استفاده از مبدل‌های چندپورته با قابلیت نصب ذخیره‌ساز

حمید کاوش و مهدی سرادارزاده

ترانسفورماتور فرکانس خط^۳ (LFT) با PET می‌تواند کاهش حجم و وزن به یک سوم و کاهش اتلاف توان به نصف را ایجاد کند و همچنان از نظر هزینه با LFT رقابت کند [۸].

در توپولوژی‌های PET معمولاً از ساختار مدولار استفاده می‌شود، که باعث کاهش هزینه‌های تولید و افزایش اطمینان می‌شود [۹]. معمولاً دو گزینه برای PET مدولار در نظر گرفته می‌شود: پیکربندی پل H آشاری^۴ (CHB) و PET مبتنی بر مبدل چندسطحی مدولار^۵ (MMC) [۱۰] و [۱۱]. CHB در مقایسه با MMC به دلیل کاربردهای متنوع‌تر، کنترل و مدیریت ساده‌تر و سادگی در طراحی و اجرا ترجیح داده می‌شود.

در سیستم‌های تک فاز، دکوپله کردن توان معمولاً نیازمند خازن‌های بزرگ برای ذخیره توان‌های اعوجاجی با فرکانس پایین است [۱۲] تا [۱۶]. اما در سیستم‌های سه فاز، تعامل بین فازها امکان خنثی کردن توان‌های اعوجاجی را فراهم می‌کند. پل فعال چهارگانه^۶ (QAB) که دارای سه درگاه اولیه و یک درگاه ثانویه است، یک راه ایده‌آل برای عمل به عنوان کانال‌های تعاملی توان بین فازها است [۱۷] تا [۲۰]. PET مبتنی بر روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک رابط با چگالی توان بالا بین شبکه سه فاز سه سیمه AC و شبکه DC عمل کند [۲۱]. با این حال، مسئله عدم تعادل توان سه فاز بر دکوپله کردن توان بسیار تأثیرگذار است و نمی‌تواند نادیده گرفته شود.

با توجه به اینکه مبدل پل فعال چندگانه^۷ (MAB) دارای چندین درگاه برای اتصال به بارها و منابع است، می‌توان از مزایای ذخیره‌ساز نیز در سیستم استفاده کرد و مبدل به جای QAB از پل فعال پنج‌گانه^۸ (PAB) تشکیل شود. حضور ذخیره‌سازها در ساختار PET، مزایای فراوانی از جمله مدیریت تقاضا و توان، تأمین پایداری، مدیریت انرژی تجدیدپذیر و افزودن انعطاف‌پذیری به شبکه را به همراه دارد.

علاوه بر بحث توپولوژی، طراحی ترانسفورماتورها با تعداد سیم پیچی زیاد، توان بالا و در فرکانس‌های بالا یکی از چالش‌های اساسی این ساختارها می‌باشد. در [۲۲] روش طراحی و بهینه‌سازی ترانسفورماتور با توان و فرکانس بالا جهت استفاده در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت بیان شده است. در [۲۳] تا [۲۵] سه طراحی با جزئیات جهت ساخت ترانسفورماتورهای مبدل‌های الکترونیک قدرت با فرکانس در محدوده ۵۰ کیلوهرتز و توان بالا ارائه شده است که هر کدام می‌توانند جهت طراحی

چکیده: ترانسفورماتور الکترونیک قدرت (PET) به‌عنوان جایگزینی مناسب برای ترانسفورماتورهای معمول فرکانس خط (LFT) در سیستم‌های قدرت مدرن در نظر گرفته می‌شود. همچنین، در کاربردهای با توان و ولتاژ بالا، ساختارهای مدولار مانند پل H آشاری (CHB)، به عنوان راه‌حل‌های مناسب برای طراحی PET شناخته می‌شوند. با این حال، در توپولوژی‌ها موجود معرفی شده، توان‌های اعوجاجی فرکانس پایین در خازن‌های لینک DC و عملکرد نامناسب در هنگام خطا می‌تواند از معضلات این توپولوژی‌ها باشد که معمولاً بر اساس مبدل پل فعال دوگانه (DAB) طراحی می‌شوند. به منظور حل این مسئله، این مقاله چند ساختار مبتنی بر مبدل‌های چندپورته پیشنهاد می‌کند که با پیکربندی مناسب می‌توانند معضلات مطرح شده را رفع کنند. استفاده از چند مبدل پل فعال پنج‌گانه و ابرخازن و ارائه یک روش کنترل مناسب جهت کنترل توان بین پورت‌ها به طراحی جدید یک ترانسفورماتور الکترونیک قدرت با دینامیک بالا و قابلیت عملکرد در هنگام خطا در MV و LV منجر خواهد شد. طراحی مفهومی و مطالعات شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از Matlab/Simulink اثربخشی و عملکرد مناسب توپولوژی‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: پل فعال چندگانه، ترانسفورماتور الکترونیک قدرت، ذخیره‌سازی انرژی، شیفیت فاز تکی.

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت^۱ (PET) که به عنوان ترانسفورماتور حالت جامد^۲ (SST) نیز شناخته می‌شوند، به دلیل ویژگی‌هایی همچون کاهش وزن/حجم، کنترل انعطاف‌پذیر سیلان توان، بهبود کیفیت توان و افزایش قابلیت اطمینان و ...، توجه چشمگیری به خود جلب کرده‌اند [۱] تا [۳]. PET در کاربردهای شبکه‌های هوشمند [۴] و [۵]، و سایر زمینه‌ها نظیر درایوهای کششی [۶] و [۷] فرصت‌های وسیعی را فراهم کرده است. با توسعه توزیع DC، ترانسفورماتور الکترونیک قدرت به یک عنصر حیاتی در تسهیل ارتباط بین شبکه‌های AC و DC تبدیل می‌شود. یک تحقیق جالب نشان می‌دهد که در کاربردهای سه‌فاز از ولتاژ MV-AC به ولتاژ LV-DC، جایگزین کردن

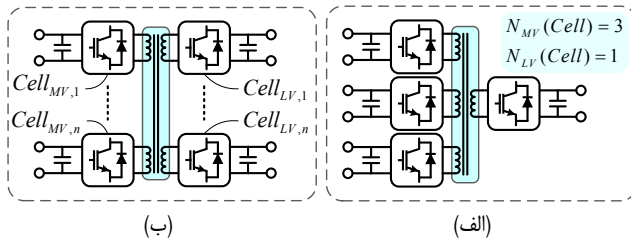
این مقاله در تاریخ ۱۵ دی ماه ۱۴۰۳ دریافت و در تاریخ ۸ اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ بازنگری شد.

حمید کاوش، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران، (email: hamidkavosh96@gmail.com).

مهدی سرادارزاده (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران، (email: saradar@jsu.ac.ir).

1. Power Electronic Transformer
2. Solid State Transformer

3. Line Frequency Transformer
4. Cascaded H-Bridge
5. Modular Multilevel Converter
6. Quadruple Active Bridge
7. Multiple Active Bridge
8. Pentuple Active Bridge



شکل ۲: بلوک دیاگرام مبدل MAB (الف) طرح کلی مبدل چند پورته (ب) پیکر بندی پیشنهادی مبدل QAB.

همانطور که از (۳) مشاهده می‌شود p_{s_aj} شامل دو بخش DC و توان‌های اعوجاجی مرتبه دوم است. این توان‌های اعوجاجی مرتبه دوم به طور کامل توسط خازن‌های ماژول جذب می‌شوند که در نتیجه باعث می‌شود برای داشتن ریبیل ولتاژ قابل قبول به خازن‌هایی با ظرفیت بزرگ‌تر نیاز باشد.

۳- ترانسفورماتور الکترونیک قدرت مبتنی بر مبدل پل فعال چندگانه

۳-۱ مبدل پل فعال چندگانه

پل فعال چندگانه (MAB) یک راه‌حل جایگزین برای DAB به شمار می‌رود. استفاده از MAB در مرحله DC/DC ترانسفورماتور الکترونیک قدرت موجب کاهش تعداد ترانسفورماتورها و ماژول‌ها در مقایسه با طراحی مبتنی بر DAB می‌شود، در حالی که مزایای DAB همچنان حفظ می‌گردد.

شکل ۲- الف فرم کلی مبدل MAB را نمایش می‌دهد که می‌تواند شامل هر تعداد سلول باشد. در شکل ۲- ب پیکربندی خاصی از QAB را نشان می‌دهد که در آن سه پل H در سمت ولتاژ بالا و یک پل H در سمت ولتاژ پایین وجود دارد. مزیت این پیکربندی، قابلیت سرکوب هارمونیک‌های مرتبه دوم منتقل شده از سمت شبکه می‌باشد. اگر توان‌های سه فاز متعادل باشند، توان‌های ورودی به b_j و c_j عبارتند از:

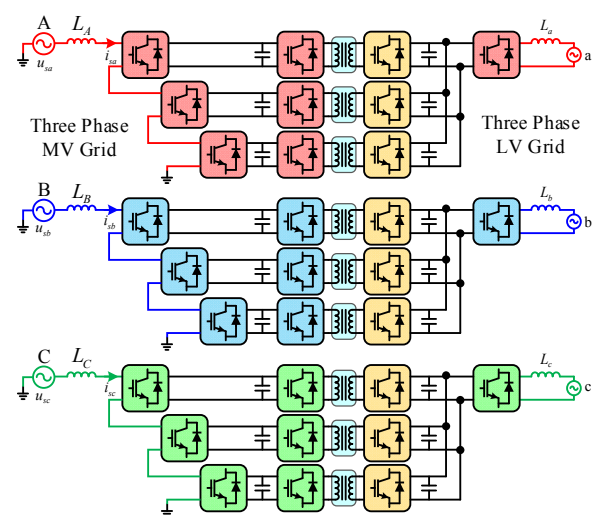
$$p_{s_bj} = \frac{U_s I_s}{2N} \cos \theta - \frac{U_s I_s}{2N} \cos(2\omega t - \theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (4)$$

$$p_{s_cj} = \frac{U_s I_s}{2N} \cos \theta - \frac{U_s I_s}{2N} \cos(2\omega t - \theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (5)$$

اگر توان‌های نوسانی از طریق سه پورت اولیه ترانسفورماتور چهار سیم‌پیچه جریان یابند، اعوجاج‌های مرتبه دوم به‌طور مؤثر از طریق شار پیوندی خنثی می‌شوند. در نتیجه، هیچ اعوجاج ولتاژ فرکانس پایین در خازن‌های LVDC ایجاد نخواهد شد. این موضوع می‌تواند موجب کاهش ظرفیت و حجم خازن‌های مورد نیاز شود. علاوه بر این، با توجه به ساختار بسیار یکپارچه ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه، حجم آن نسبت به ترانسفورماتورهای دو سیم‌پیچه مرسوم کوچکتر خواهد بود. این ویژگی‌ها پیکربندی پیشنهادی را از نظر چگالی توان بسیار رقابتی می‌سازد.

۳-۲ قابلیت ذخیره‌سازی در مبدل پل فعال چندگانه

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که برای افزودن ذخیره‌ساز، یک سلول دیگر به مبدل QAB اضافه شده و مبدل DC/DC به PAB تبدیل می‌شود. ذخیره‌ساز می‌تواند باتری یا ابرخازن باشد.



شکل ۱: ترانسفورماتور الکترونیک قدرت مبتنی بر مبدل پل فعال دوگانه.

ترانسفورماتور مبدل‌های پل فعال چندگانه نیز استفاده شوند.

در این مقاله سه ساختار جدید برای PET بر مبنای PAB با توانایی ذخیره‌سازی انرژی پیشنهاد شده است. این ساختارها از نظر حذف اعوجاجات توانی مرتبه دوم و قابلیت عملکرد در هنگام خطا در سمت ولتاژ بالا یا پایین با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند و معایب و مزایای آنها ارزیابی می‌شود.

در بخش دوم، ابتدا ساختارهای PET مبتنی بر CHB و DAB مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و سپس ولتاژهای مرتبه دوم در خازن‌ها بررسی می‌شود. در بخش سوم، پیکربندی بهینه مبدل MAB برای خنثی کردن نوسانات مرتبه دوم و اضافه کردن قابلیت ذخیره‌سازی بحث می‌شود. در بخش چهارم، توپولوژی‌های پیشنهادی و نیز مدل‌سازی و کنترل آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده و در نهایت، در بخش ششم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- بررسی توان اعوجاجی مرتبه دوم در PET مبتنی بر CHB

در شکل ۱، ساختار PET مبتنی بر CHB و DAB برای ارتباط شبکه سه‌فاز MV با شبکه LV نمایش داده شده است. هر فاز به ۳ پل H آبشاری متصل می‌شود. این پل‌های H به عنوان رکتیفایرها عمل کرده و سپس به DAB متصل می‌شوند. خروجی DAB موازی شده و لینک DC در سمت LV ایجاد می‌کنند. سپس با استفاده از اینورترهای تک‌فاز، ولتاژهای AC برای شبکه‌های LV تولید می‌شوند.

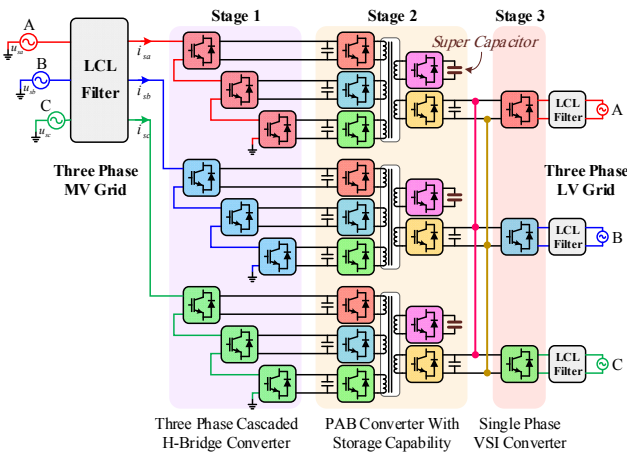
به طور کلی در صورت وجود N ماژول در هر فاز از PET ($a_1 \sim a_N$, $b_1 \sim b_N$, $c_1 \sim c_N$) به صورت (۱) و (۲) هستند:

$$u_{sa} = U_s \sin(\omega t) \quad (1)$$

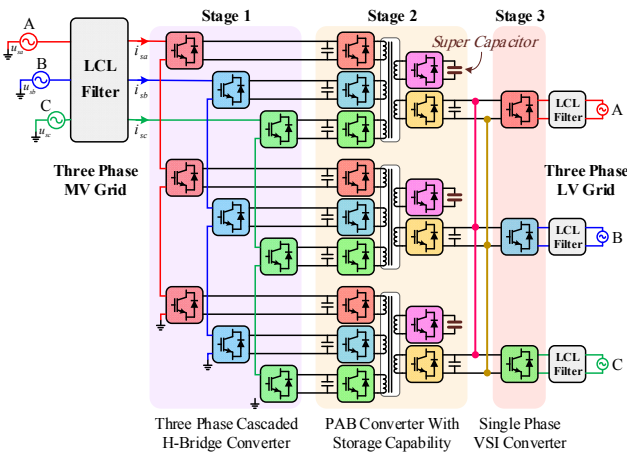
$$i_{sa} = I_s \sin(\omega t - \theta) \quad (2)$$

که در آن U_s و c دامنه‌های ولتاژ و جریان، ω و θ به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و زاویه ضریب توان هستند. با فرض متعادل بودن توان عبوری از هر کدام از ماژول‌ها، توان ورودی ماژول $a_j = j(1 \sim N)$ به صورت (۳) بیان می‌شود:

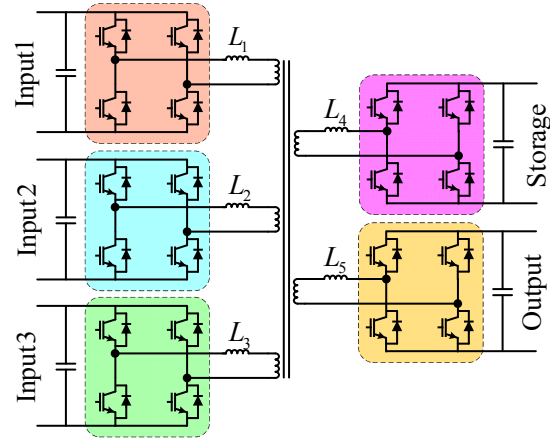
$$p_{s_aj} = \frac{u_{sa} i_{sa}}{N} = \frac{U_s I_s}{2N} \cos \theta - \frac{U_s I_s}{2N} \cos(2\omega t - \theta) \quad (3)$$



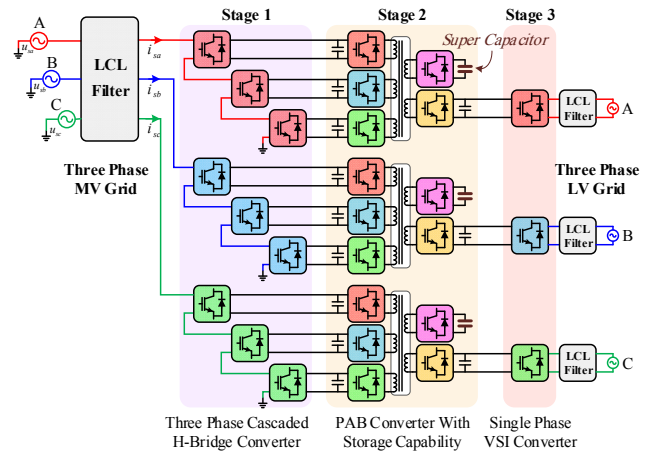
شکل ۵: توپولوژی پیشنهادی PET دوم.



شکل ۶: توپولوژی پیشنهادی سوم



شکل ۳: مدل مبدل پل فعال پنج گانه (PAB) با قابلیت ذخیره سازی.



شکل ۴: توپولوژی پیشنهادی اول.

۴- ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت پیشنهادی

۴-۱ توپولوژی‌ها

هدف این مقاله، ارائه چند ساختار به‌عنوان جایگزینی برای ساختارهای قبلی می‌باشد. مراحل طراحی و کنترل مرتبط با این توپولوژی‌ها را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم کرد:

بخش ۱: این مرحله شامل تبدیل AC/DC چند سلولی در سطح ولتاژ متوسط است. برای مدولار بودن و رویکرد کنترلی ساده از مبدل CHB استفاده شده است.

بخش ۲: این مرحله شامل توپولوژی‌های مبدل DC/DC برای تبدیل DC ولتاژ بالا به DC ولتاژ پایین است. در این بخش، مبدل MAB با کلیدزنی به روش شیفت فاز به کار گرفته شده است که امکان اتصال ذخیره‌ساز را نیز فراهم می‌کند.

بخش ۳: این مرحله شامل اینورتر منبع ولتاژ (VSI) برای تبدیل باس DC ولتاژ پایین برای ارائه ولتاژ AC ۴۰۰ ولت جهت تغذیه بارهای مسکونی می‌باشد. برای این منظور می‌توان سه VSI تکفاز دو سطحی برای هر فاز استفاده کرد که راه حلی ارجم برای تغذیه بارهای نامتعادل و غیر خطی می‌باشد.

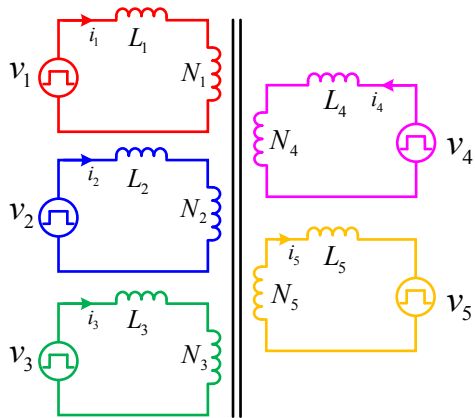
پیکر بندگی توپولوژی پیشنهادی اول در شکل ۴ نشان داده شده است. مرحله اول PET، یک یکسوساز AC/DC از نوع پل H آشکاری است که

ولتاژ ورودی AC ولتاژ بالا را به لینک‌های DC آشکاری تبدیل می‌کند. مرحله بعد شامل یک مبدل DC/DC پنج‌پورته است که ولتاژهای DC ورودی در سطح ولتاژ بالا را به یک باس DC ولتاژ پایین تبدیل می‌کند. در این مبدل، امکان اتصال ذخیره‌ساز نیز وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که از طریق یک پل H می‌توان یک باتری یا ابرخازن را شارژ کرده و در مواقع مورد نیاز از آن استفاده کرد. در نهایت، ولتاژ DC توسط یک اینورتر تک‌فاز به ولتاژ AC در سطح ولتاژ پایین تبدیل می‌شود.

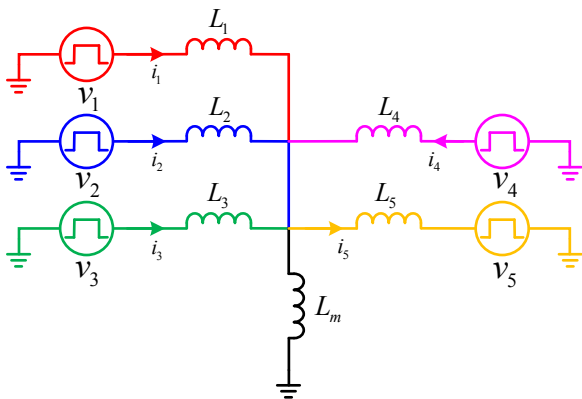
نکته اساسی مشهود در این ساختار این است که فازهای A، B و C کاملاً از یکدیگر مستقل هستند. در این پیکر بندگی، در صورتی که خطای تک‌فاز در سمت MV برای فاز A رخ دهد، کل توان ورودی به PAB مربوط به فاز A قطع می‌شود و در نتیجه، دیگر توانی به مبدل سمت LV تزریق نخواهد شد.

توپولوژی دوم که در شکل ۵ نشان داده شده است، کاملاً مشابه توپولوژی اول است با این تفاوت که در این ساختار، لینک‌های LVDC به یکدیگر متصل شده‌اند. اتصال لینک‌های LVDC باعث می‌شود که حتی در صورت اختلاف بار میان فازهای مختلف در سمت LV، توان مصرفی از LVDC هر PAB به صورت متعادل و یکسان برداشت شود. در نتیجه، ذخیره سازها نیز عملکرد یکسانی خواهند داشت.

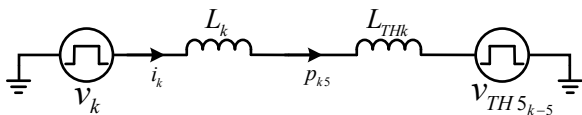
توپولوژی سوم که در شکل ۶ نمایش داده شده است، مشابه توپولوژی دوم است با این تفاوت که در این ساختار، از فازهای مختلف به‌عنوان ورودی یک PAB استفاده شده است. در این حالت، در صورت بروز خطای تک‌فاز در سمت MV، توان ورودی به PAB به‌طور کامل قطع



شکل ۷: مدل PAB با منبع ولتاژ و ترانسفورماتور پنج سیم پیچه.



شکل ۸: مدار معادل PAB با مدل T ترانسفورماتور پنج سیم پیچه.



شکل ۹: مدار معادل تونن بین پورت k و پورت ۵ در PAB.

زاویه شیفت فاز بین پورت k و پورت ۵ می‌باشد.

طبق (۶) توان انتقال یافته از یک مبدل سمت اولیه به سمت ثانویه به L_{k5} وابسته است. در اینجا لازم است که مقدار L_{k5} از طریق یک مدل DAB معادل تجزیه و تحلیل شود. مدار معادل PAB با مدل نوع T ترانسفورماتور پنج سیم پیچه در شکل ۸ نشان داده شده است که در آن L_m اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی می‌باشد. مدار معادل تونن بین پورت k و پورت ۵ در شکل ۹ آورده شده است.

V_{TH5k-5} ولتاژ معادل تونن است که به صورت (۷) محاسبه می‌شود:

$$\left\{ \begin{aligned} v_{TH51-5} &= \frac{L_2 L_3 L_4}{L_1 L_2 L_3 + L_1 L_2 L_4 + L_1 L_3 L_4 + L_2 L_3 L_4} \cdot v_5 \\ v_{TH52-5} &= \frac{L_1 L_3 L_4}{L_1 L_2 L_3 + L_1 L_2 L_4 + L_1 L_3 L_4 + L_2 L_3 L_4} \cdot v_5 \\ v_{TH53-5} &= \frac{L_1 L_2 L_4}{L_1 L_2 L_3 + L_1 L_2 L_4 + L_1 L_3 L_4 + L_2 L_3 L_4} \cdot v_5 \\ v_{TH54-5} &= \frac{L_1 L_2 L_3}{L_1 L_2 L_3 + L_1 L_2 L_4 + L_1 L_3 L_4 + L_2 L_3 L_4} \cdot v_5 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

L_{THk} اندوکتانس نشی معادل تونن است و می‌توان آن را به صورت (۸) محاسبه کرد

نمی‌شود و امکان تزریق توان از دو فاز دیگر به PAB همچنان وجود دارد. علاوه بر این، اعوجاج‌های مرتبه دوم منتقل شده از سمت شبکه MV نیز به‌طور مؤثر از طریق شار پیوندی خنثی می‌شوند.

۴-۲ مقایسه توپولوژی‌های پیشنهادی با توپولوژی مبتنی بر پل فعال دوگانه

ساختارهای مبتنی بر DAB و PAB را می‌توان از جنبه‌هایی مانند تعداد کلیدها، ظرفیت خازن مورد استفاده، چگالی توان، بازدهی و قابلیت نصب ذخیره‌ساز با یکدیگر مقایسه کرد.

تعداد کلیدها: برای انتقال یک توان مشخص، توپولوژی‌های مبتنی بر DAB به تعداد کلیدهای بیشتری نسبت به PAB نیاز دارند. استفاده از PAB این امکان را فراهم می‌کند که در هر فاز به دو پل H کمتر نسبت به DAB نیاز باشد؛ به عبارت دیگر، در یک سیستم سه‌فاز، مجموعاً شش پل H کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ظرفیت خازن: در ساختار PAB با توجه به استفاده از ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه، امکان حذف نوسانات مرتبه دوم توان فراهم می‌شود. این ویژگی موجب می‌گردد که بتوان از خازن‌هایی با ظرفیت کوچک‌تر استفاده کرد.

چگالی توان: با کاهش ظرفیت خازن، حذف دو پل H در هر فاز، و فشرده‌تر شدن ساختار ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه، چگالی توان در توپولوژی‌های مبتنی بر PAB بالاتر از ساختارهای مشابه مبتنی بر DAB خواهد بود.

بازدهی: به دلیل کاهش تعداد کلیدها و همچنین کاهش تعداد هسته‌های ترانسفورماتور، تلفات سیستم در PAB کمتر از DAB است؛ در نتیجه، بازدهی سیستم در ساختارهای PAB بالاتر خواهد بود.

قابلیت نصب ذخیره‌ساز: در ساختار DAB، برخلاف PAB، به دلیل محدودیت‌های ساختاری امکان نصب ذخیره‌ساز وجود ندارد.

توسعه مبدل: در مبدل‌های پیشنهادی نیز قابلیت توسعه مبدل برای استفاده از ادوات با ولتاژ پایینتر جهت ساخت ولتاژهای MV همانند DAB وجود دارد. به عنوان مثال، مبدل CHB می‌تواند به جای سه ماژول HB در هر فاز، شامل شش ماژول HB باشد. که هر دو ماژول سری به یک فاز متصل شده‌اند و در خروجی سمت LV هم ماژول‌های هر فاز با یکدیگر موازی می‌شوند. در این صورت، تعداد ترانسفورماتورهای استفاده شده نیز به شش عدد افزایش می‌یابد.

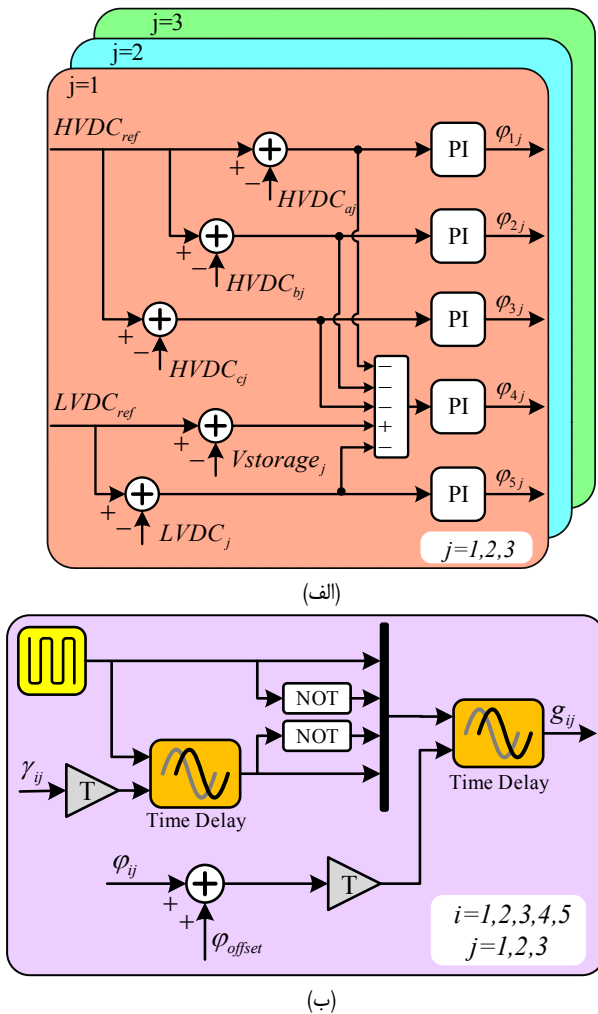
۴-۳ مدل سازی مدار معادل PAB در PET

با در نظر گرفتن مولفه‌های مرتبط با فرکانس کلیدزنی، مدار معادل منبع ولتاژ کنترل شده PAB در شکل ۷ نمایش داده شده است.

سیم پیچ‌های N_1 ، N_2 و N_3 به عنوان سه سیم‌پیچ اولیه PAB در نظر گرفته شده‌اند که به ترتیب مربوط به فازهای A، B و C هستند. سیم‌پیچ N_4 مربوط به ذخیره‌ساز انرژی و سیم‌پیچ N_5 نیز سیم‌پیچ ثانویه است. سلف L_k بیانگر اندوکتانس نشی ترانسفورماتور می‌باشد. با فرض استفاده از کنترل شیفت فاز تکی (SPS)، توان متوسط انتقال یافته از پورت k به پورت ۵ در یک دوره کلیدزنی مطابق با معادله (۶) قابل محاسبه است

$$p_{k5} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_k i(\tau) d\tau = \frac{v_k v_5}{2\pi^2 f_s L_{k5}} \varphi_{k5} (\pi - \varphi_{k5}) \quad (6)$$

که در آن v_k و v_5 ولتاژ پورت k و پورت ۵، f_s فرکانس کلیدزنی، T_s دوره کلیدزنی، L_{k5} اندوکتانس معادل بین پورت k و پورت ۵ و φ_{k5}



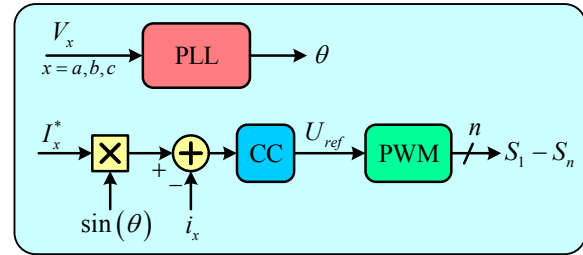
شکل ۱۱: کنترل کننده PAB (الف) ایجاد شیفت فازهای خارجی به واسطه کنترل ولتاژ لینک DC و (ب) تولید فرمان گیت.

۵- نتایج شبیه سازی

توپولوژی‌های مورد نظر برای ترانسفورماتور الکترونیک قدرت با نرم-افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده است. اطلاعات سیستم شبیه-سازی شده در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است. برای مقایسه هر سه نوع توپولوژی معرفی شده شبیه‌سازی به شرح زیر در نظر گرفته شده است و سپس رفتار هر کدام از توپولوژی‌ها در طی این فرایند نشان داده شده است. شکل ۱۲ (الف) و (ب)، جریان‌های سه فاز سمت شبکه MV و LV را طی این مجموعه شبیه‌سازی به ترتیب نشان می‌دهد. در ابتدای شبیه‌سازی تا لحظه ۰/۴ ثانیه، توان انتقالی در سه فاز متعادل بوده و جریان‌های هر فاز در سطح نامی خود پایدار هستند. در لحظه ۰/۴ ثانیه، یک تغییر در بار سمت LV اعمال شده است؛ به گونه‌ای که جریان سمت LV در فاز A به میزان ۳۰ درصد کاهش یافته، جریان در فاز B بدون تغییر و برابر مقدار نامی باقی مانده و جریان در فاز C به میزان ۳۰ درصد افزایش یافته است. در ادامه رفتار هر کدام از توپولوژی‌ها نسبت به این تغییرات مشاهده می‌شود.

۱-۵ توپولوژی اول

در توپولوژی اول که در شکل ۴ نشان داده شده است، با در نظر گرفتن مبدل‌های مستقل برای هر فاز از ترانسفورماتور، در مواقع کمبود یا اضافه توان خروجی، توان با خازن ذخیره‌ساز تبادل می‌شود. در صورت کاهش توان خروجی (مثلاً در فاز A)، اضافه توان به خازن وارد می‌شود که باعث



شکل ۱۰: بلوک دیاگرام کنترل کننده CHB با کنترلر جریان.

$$\left\{ \begin{aligned} L_{TH1} &= \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4} + \frac{1}{L_5} \right)^{-1} \\ L_{TH2} &= \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4} + \frac{1}{L_5} \right)^{-1} \\ L_{TH3} &= \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_4} + \frac{1}{L_5} \right)^{-1} \\ L_{TH4} &= \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_5} \right)^{-1} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

توان انتقال یافته از پورت k به پورت ۵ را می‌توان توسط (۹) بیان کرد:

$$P_{k5} = \frac{V_k V_{TH5k-5}}{2\pi^2 f_s (L_k + L_{THk})} \varphi_{k5} (\pi - \varphi_{k5}) \quad (9)$$

۴-۴ سیستم کنترلی

در حلقه کنترل جریان مبدل CHB، به طور کلی از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی PI و یا از کنترل کننده تناسبی-رزونانسی PR می‌توان استفاده کرد. در این میان، استفاده از PR نسبت به PI ارجحیت دارد، چرا که کنترل کننده PI به تنهایی توانایی دنبال کردن سیگنال‌های سینوسی را نداشته و نیاز به قاب مرجع سنکرون دارد.

در این مقاله، هدف اصلی کنترل کننده CHB تزریق جریان مرجع به سیستم می‌باشد و وظیفه کنترل ولتاژ لینک HVDC و LVDC به مبدل DC/DC سپرده شده است. بلوک دیاگرام کنترل کننده CHB در شکل ۱۰ نمایش داده شده است که در آن از کنترل کننده جریان استفاده شده است. برای ردیابی جریان از کنترلر PR بهره گرفته شده است. تابع تبدیل کنترلر PR به صورت (۱۰) است:

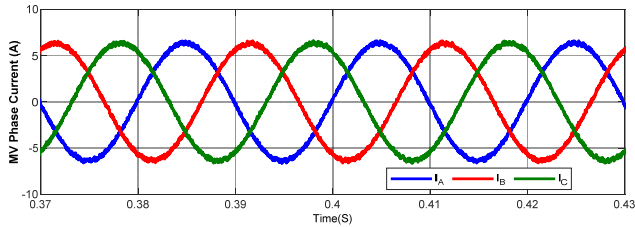
$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (10)$$

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، کنترل کننده مبدل میانی وظیفه کنترل ولتاژ لینک‌های HVDC و LVDC را بر عهده دارد. شماتیک این کنترل کننده در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

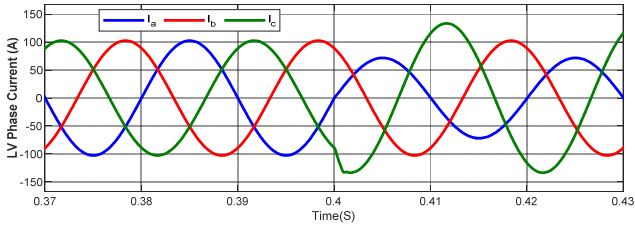
در شکل ۱۱ (الف) ولتاژ هر کدام از لینک‌های متصل به ترانسفورماتور با مقدار مرجع مقایسه شده و پس از وارد شدن به کنترل کننده PI مقدار شیفت فاز خارجی مربوط به هر کدام از پل‌ها φ_{ij} ایجاد می‌شود که در آن j (۱~۳) ترانسفورماتور و i (۱~۵) پل H مد نظر می‌باشد.

در شکل ۱۱ (ب) نحوه ایجاد فرمان گیت برای مبدل PAB نشان داده شده است که در آن شیفت فاز داخلی است و همچنین T به صورت (۱۱) می‌باشد

$$T = \frac{1}{f_{sw} \times 360} \quad (11)$$

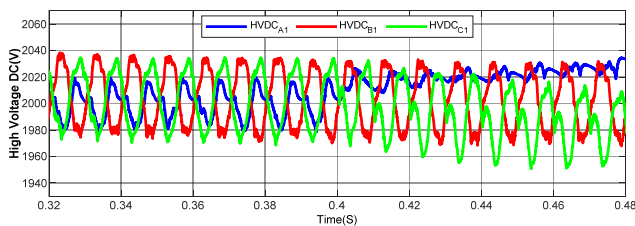


(الف)

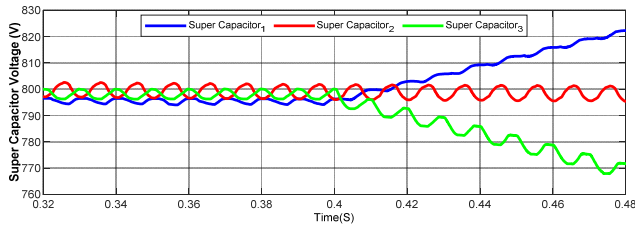


(ب)

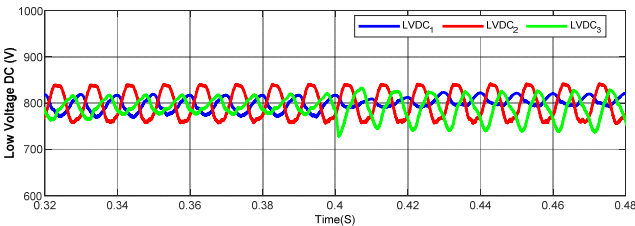
شکل ۱۲: (الف) جریان‌های فاز سمت MV و (ب) جریان‌های فاز سمت LV.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۳: توپولوژی اول: (الف) ولتاژ HVDC مربوط به اولین پل H فازهای A، B و C، (ب) ولتاژ خازن‌های ذخیره‌ساز و (ج) ولتاژ LVDC در مواجهه با بارهای نامتقارن.

در شبیه‌سازی توپولوژی اول مشاهده شد که این ساختار از نظر قابلیت اطمینان محدودیت‌هایی دارد و در مواجهه با شرایط بار نامتقارن، عملکرد پایداری ارائه نمی‌دهد. در این توپولوژی، در صورت وقوع خطای تک‌فاز در سمت LV، کل توان ورودی به PAB به سمت ذخیره‌ساز هدایت می‌شود که در نتیجه، خازن ذخیره‌ساز به سرعت شارژ می‌گردد. این امر موجب افزایش ولتاژ لینک DC شده و در نهایت به ناپایداری سیستم منجر می‌شود.

همچنین در صورت وقوع خطای تک‌فاز در سمت MV، توان ورودی به PAB به‌طور کامل قطع می‌شود و مسیر تغذیه توان به سمت LV از بین می‌رود.

جدول ۱: مشخصات ترانسفورماتور الکترونیک قدرت شبیه‌سازی شده.

مقدار	نام متغیر	توان نامی
۵۰ kW		ولتاژ شبکه سمت MV
۶/۶ kV		ولتاژ شبکه سمت LV
۴۰۰ V		فرکانس شبکه
۵۰ Hz		ولتاژ لینک HVDC (هر سلول)
۲ kV		خازن فیلتر HVDC
۸۲ μF		فرکانس کلیدزنی اینورتر
۴ kHz		تعداد ماژول‌های هر فاز
۳		ولتاژ لینک LVDC
۸۰۰ V		خازن فیلتر LVDC
۸۲۰ μF		فرکانس کلیدزنی PAB
۲۰ kHz		مجموع سلف نشستی و سلف کمکی PAB
۷۰ μH		خازن ذخیره‌ساز
۱۸ mF		

جدول ۲: مشخصات فیلترهای LCL سمت MV و LV.

نام متغیر	فیلتر LCL سه‌فاز سمت MV	فیلتر LCL تک‌فاز سمت LV
سلف سمت مبدل	۱۳۴/۷۲ mH	۴/۸۹۹ mH
سلف سمت شبکه	۵۱۹۹۶ mH	۰/۵۷۲۹۶ mH
خازن فیلتر	۰/۱۸۲۶۸ μF	۱۶/۵۷۹ μF
مقاومت فیلتر	۴۵۳/۱۷ Ω	۵/۵۶ Ω

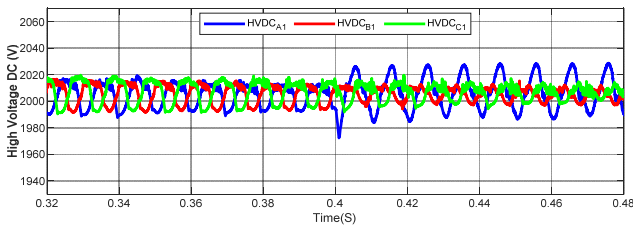
افزایش ولتاژ خازن می‌شود. به عبارت دیگر، خازن به عنوان یک ذخیره‌کننده انرژی عمل می‌کند. از سوی دیگر، در صورت افزایش توان خروجی (مثلاً در فاز C)، از توان ذخیره‌شده در خازن‌ها استفاده می‌شود و افزایش توان مورد نیاز را تأمین می‌کند که باعث کاهش ولتاژ آن‌ها می‌شود.

در شکل ۱۳، ولتاژ HVDC مربوط به اولین پل H فازهای A، B و C، ولتاژ خازن‌های ذخیره‌ساز و ولتاژ LVDC در مواجهه با بارهای نامتقارن نشان داده شده است و همچنین تاثیر تغییر توان خروجی بر ولتاژهای HVDC، LVDC و خازن‌های ذخیره‌ساز مشاهده می‌شود.

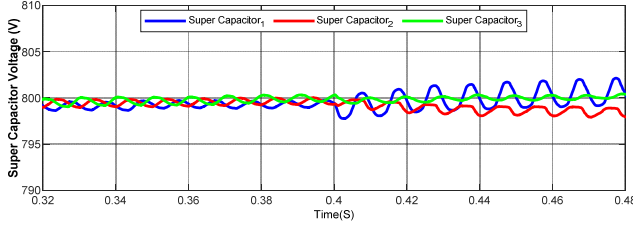
در شکل ۱۴ توان ورودی از سمت MV، توان ذخیره‌ساز و توان خروجی سمت LV نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، خازن ذخیره‌ساز مربوط به فاز A توان دریافت کرده، توان خازن ذخیره‌ساز مربوط به فاز B بدون تغییر باقی مانده است و خازن ذخیره‌ساز مربوط به فاز C توان تحویل داده است.

در شبیه‌سازی توپولوژی اول مشاهده شد که این ساختار از نظر قابلیت اطمینان محدودیت‌هایی دارد و در مواجهه با شرایط بار نامتقارن، عملکرد پایداری ارائه نمی‌دهد. در این توپولوژی، در صورت وقوع خطای تک‌فاز در سمت LV، کل توان ورودی به PAB به سمت ذخیره‌ساز هدایت می‌شود که در نتیجه، خازن ذخیره‌ساز به سرعت شارژ می‌گردد. این امر موجب افزایش ولتاژ لینک DC شده و در نهایت به ناپایداری سیستم منجر می‌شود.

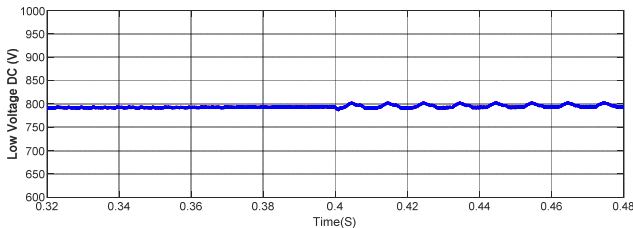
همچنین در صورت وقوع خطای تک‌فاز در سمت MV، توان ورودی به PAB به‌طور کامل قطع می‌شود و مسیر تغذیه توان به سمت LV از بین می‌رود.



(الف)

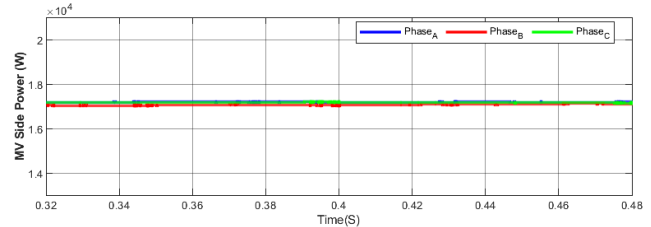


(ب)

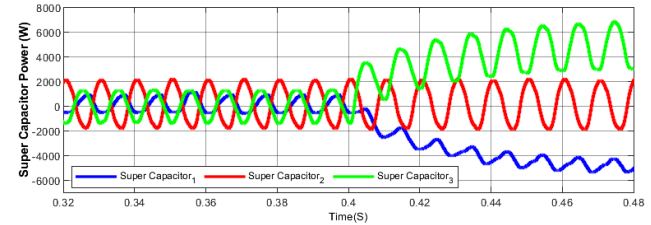


(ج)

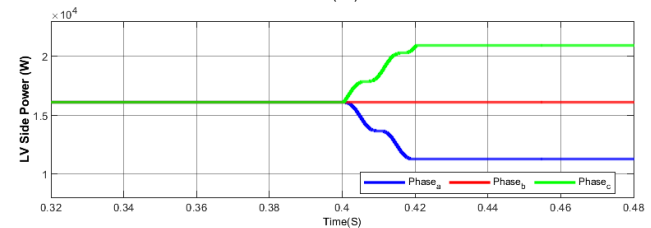
شکل ۱۴: توپولوژی اول: (الف) توان ورودی از سمت MV، (ب) توان ذخیره‌ساز و (ج) توان خروجی سمت LV در مواجهه با بارهای نامتقارن.



(الف)

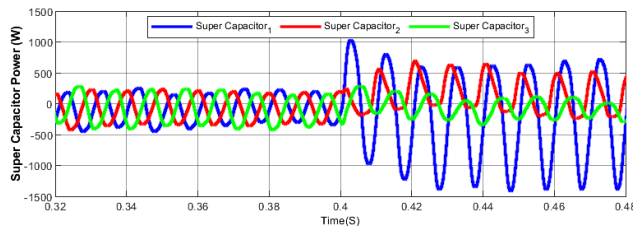


(ب)



(ج)

شکل ۱۴: توپولوژی اول: (الف) توان ورودی از سمت MV، (ب) توان ذخیره‌ساز و (ج) توان خروجی سمت LV در مواجهه با بارهای نامتقارن.



شکل ۱۵: توپولوژی دوم: توان ذخیره ساز در مواجهه با بارهای نامتقارن.

در شکل ۱۵، ولتاژ HVDC مربوط به اولین پل H فازهای A، B و C، ولتاژ خازن های ذخیره ساز و ولتاژ LVDC در مواجهه با بارهای نامتقارن نشان داده شده است و همچنین تاثیر عدم تقارن بار بر خازن های ذخیره ساز نیز در شکل ۱۶ مشاهده می شود.

در شبیه سازی توپولوژی دوم مشاهده شد که با اتصال لینک های LVDC به یکدیگر، عملکرد این توپولوژی در مواجهه با بارهای نامتقارن نسبت به توپولوژی اول به مراتب مطلوب تر است. این اتصال باعث شده است که توان میان فازها به طور مؤثر به اشتراک گذاشته شود و سیستم پایداری بهتری از خود نشان دهد. با این حال، مشابه توپولوژی اول، در صورت وقوع خطای تک فاز در سمت MV، توان ورودی به PAB به طور کامل قطع می شود. این نقطه ضعف همچنان در توپولوژی دوم باقی است و نیازمند بررسی بیشتر و ارائه راهکار برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم می باشد. همچنین ریپل ولتاژ مرتبه دوم هارمونیک در ولتاژهای DC مشابه با مبدل اول هنوز وجود دارد.

۳-۵ توپولوژی سوم

در توپولوژی سوم که در شکل ۶ نمایش داده شده است، HVDC های هر فاز بین ورودی های PAB ها به صورت توزیع شده تقسیم شده اند. به

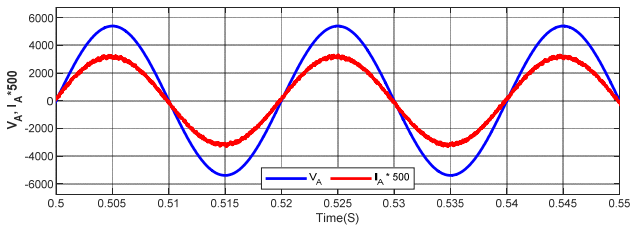
تحلیل شکل موجها نشان می دهد که در هر دو حالت وقوع خطای تک فاز، نوسانات گذرای شدید و افزایش قابل توجه ریپل ولتاژ لینک DC مشاهده می شود و سیستم پس از مدت زمان کوتاهی از پایداری خارج می شود. بنابراین، این توپولوژی نمی تواند گزینه مناسبی برای شبکه هایی باشد که احتمال بروز بارهای نامتعادل یا خطای تک فاز در آنها وجود دارد.

۲-۵ توپولوژی دوم

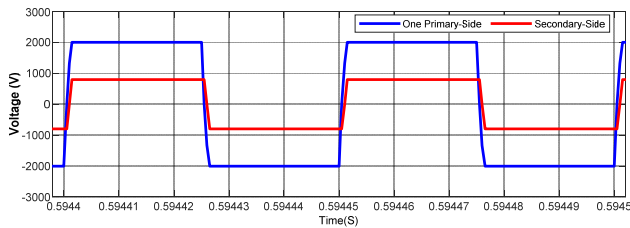
توپولوژی دوم مشابه توپولوژی اول است با این تفاوت که در این ساختار، لینک های LVDC به یکدیگر متصل شده اند. این اتصال باعث می شود که نابرابری بارهای سمت LV تاثیر کمتری بر عملکرد سیستم داشته باشد. در واقع، با اتصال لینک های LVDC، توان سه فاز به صورت اشتراکی مدیریت می شود و هر فاز می تواند متناسب با نیاز خود از توان مشترک برداشت کند. این ویژگی منجر به عملکرد مطلوب تر و متعادل تر سیستم در شرایط بارهای نامتقارن می شود.

با توجه به یکسان بودن شرایط شبیه سازی برای تمام توپولوژی ها، شکل موج های جریان فازهای سمت MV و LV و همچنین توان ورودی از سمت MV و توان خروجی سمت LV مشابه نتایج ارائه شده برای توپولوژی اول هستند؛ بنابراین از تکرار آنها صرف نظر شده است.

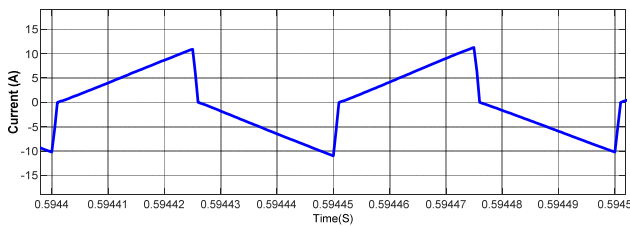
در این توپولوژی، با وجود نامتقارن بودن بارهای سه فاز، سیستم به دلیل اتصال لینک های LVDC عملکرد پایدارتر و متعادل تری از خود نشان می دهد. تحلیل شکل موجها و ولتاژها نشان می دهد که تغییرات بار در یک فاز می تواند به سرعت و به طور مؤثر توسط توان مشترک جبران شود. بنابراین، این روش می تواند به عنوان یکی از گزینه های مناسب برای سیستم هایی که با بارهای نامتعادل یا تغییرات سریع بار مواجه هستند، در نظر گرفته شود.



شکل ۱۹: توپولوژی سوم: ولتاژ و جریان سمت شبکه MV فاز A.



(الف)



(ب)

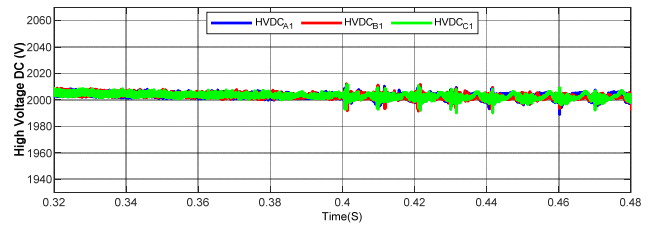
شکل ۲۰: توپولوژی سوم: شکل موج اولیه و ثانویه ترانسفورماتور چند سیم پیچ با کنترل SPS. (الف) یکی از ولتاژهای سمت اولیه و ولتاژ سمت ثانویه ترانسفورماتور چند سیم پیچ و (ب) جریان اولیه.

است ولتاژ را در مرزهای مطلوب حفظ کند. نوسان ولتاژ HVDC در این ساختار قبل از لحظه ۰/۴ ثانیه کمتر از ۱ درصد بوده، در حالی که در توپولوژی اول این نوسان نزدیک به ۳ درصد مشاهده شده است. شکل ۱۷-ب و ۱۷-ج نشان دهنده ولتاژ خازن‌های ذخیره‌ساز و LVDC در این شرایط است که نشان می‌دهد خازن‌ها بدون نوسانات زیاد عمل کرده‌اند. همانطور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، توان ذخیره‌ساز نیز در مواجهه با بارهای نامتقارن به خوبی تنظیم شده است، که نشان از پایداری و بهینه عملکردن سیستم در این شرایط دارد. این نتایج نشان می‌دهند که ترکیب اتصال لینک‌های DC با توزیع سمت MV، در مواجهه با چالش بار نامتقارن، سیستم را به طور کارآمد و پایدار مدیریت می‌کند.

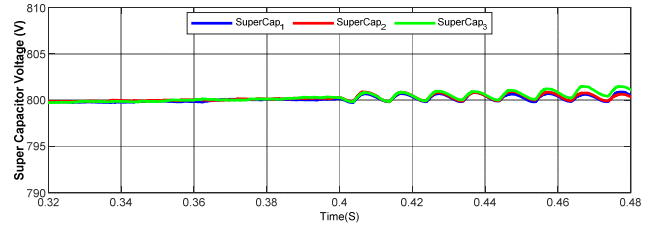
در ادامه شبیه‌سازی‌ها، شکل ۱۹ ضریب توان واحد را پس از وقوع عدم تقارن در سمت MV نشان می‌دهد که بیانگر عملکرد مناسب PET در دریافت توان صرفاً اکتیو از شبکه بالادست می‌باشد. همچنین در شکل ۲۰ کلیدزنی به روش SPS نشان داده شده است. در شکل ۲۰-الف، یکی از ولتاژهای اولیه و ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور پنج سیم پیچ با دامنه‌های ۲۰۰۰ ولت و ۸۰۰ ولت و یک شیف‌فاز جزئی نشان داده شده است. شکل ۲۰-ب جریان اولیه ترانسفورماتور پنج سیم پیچ را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که توپولوژی سوم به خوبی مدیریت بارهای نامتقارن را از خود نشان داده است و می‌تواند به عنوان یک انتخاب مناسب برای ترانسفورماتور الکترونیک قدرت در نظر گرفته شود.

۵-۴ مقایسه توپولوژی‌های پیشنهادی

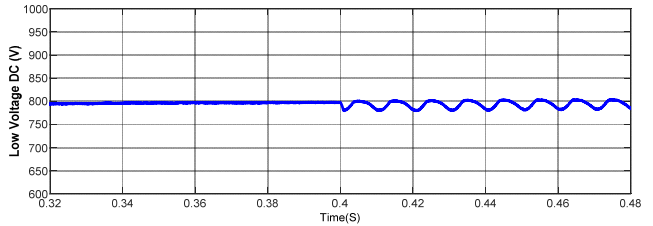
هر سه توپولوژی پیشنهادی از نظر وجود توان اعوجاجی مرتبه‌ی دوم و



(الف)

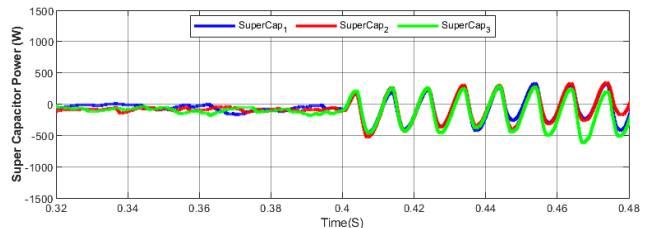


(ب)



(ج)

شکل ۱۷: توپولوژی سوم: (الف) ولتاژ HVDC مربوط به اولین پل H فازهای A, B و C. (ب) ولتاژ خازن‌های ذخیره‌ساز و (ج) ولتاژ LVDC در مواجهه با بارهای نامتقارن.



شکل ۱۸: توپولوژی سوم: توان ذخیره‌ساز در مواجهه با بارهای نامتقارن.

این معنا که هر PAB از فازهای مختلف به‌طور هم‌زمان تغذیه می‌شود. در این توپولوژی، در صورت وقوع خطای تک‌فاز در سمت MV، برخلاف توپولوژی اول، کل توان ورودی به یک PAB قطع نمی‌شود. در این ساختار، حتی در شرایط خطا، توان از دو فاز سالم به PAB منتقل می‌شود. این پیکربندی موجب می‌شود که سیستم پس از وقوع خطا با توان کاهش‌یافته، اما بدون قطع کامل عملکرد، به کار خود ادامه دهد. این قابلیت، بهبود چشمگیری در پایداری و قابلیت اطمینان سیستم ایجاد کرده است.

در واقع، از توزیع سمت MV برای بهبود پایداری سیستم و همچنین اتصال لینک‌های DC جهت مدیریت بهینه توان استفاده شده است. از این ترکیب انتظار می‌رود نسبت به توپولوژی‌های قبلی نتایج بهتری ارائه دهد. از این رو، انتخاب این توپولوژی به عنوان یک پیشنهاد بهینه در مواجهه با چالش‌های مختلف در سیستم‌های توزیع توان الکتریکی مورد پیشنهاد قرار می‌گیرد.

با توجه به اتصال لینک‌های DC و توزیع سمت MV، سیستم در مواجهه با بارهای نامتقارن نسبت به توپولوژی قبلی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. در شکل ۱۷-الف، ولتاژ HVDC مربوط به اولین پل H فازهای A, B و C را نشان می‌دهد که در این حالت سیستم توانسته

traction applications," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, no. 2, pp. 915-927, Feb. 2016.

- [7] N. Zhao, J. Liu, Y. Ai, J. Yang, J. Zhang and X. You, "Power-linked predictive control strategy for power electronic traction transformer," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 6, pp. 6559-6571, Jun. 2020.
- [8] J. E. Huber and J. W. Kolar, "Volume/weight/cost comparison of a 1 MVA 10 kV/400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 4545-4552, Pittsburgh, PA, USA, 14-18 Sept. 2014.
- [9] R. Pena-Alzola, G. Gohil, L. Mathe, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 380-387, Denver, CO, USA, 15-19 Sept. 2013.
- [10] F. Briz, M. Lopez, A. Rodriguez, and M. Arias, "Modular power electronic transformers: Modular multilevel converter versus cascaded H-bridge solutions," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 6-19, Dec. 2016.
- [11] Y. Ai, J. Liu, S. Chen, Y. Shi, and C. Pei, "An improved DC power electronic transformer based on voltage balancing converter for bipolar distribution system," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 12, pp. , Dec. 2023.
- [12] R. Wang et al., "A high power density single-phase PWM rectifier with active ripple energy storage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 5, pp. 1430-1443, May. 2010.
- [13] H. Li, K. Zhang, and H. Zhao, "DC-link active power filter for high-power single-phase PWM converters," *Journal of Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 458-467, May 2012.
- [14] B. Liu, W. Song, J. Ma, X. Feng, and W. Li, "Dynamic performance improvement of single-phase PWM converters with power hysteresis control scheme," *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 12, pp. 1894-1902, 2018.
- [15] L. Zhang and X. Ruan, "Control schemes for reducing second harmonic current in two-stage single-phase converter: An overview from DC-bus port-impedance characteristics," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 10341-10358, Oct. 2019.
- [16] Y. Xia, J. Roy and R. Ayyanar, "A capacitance-minimized, doubly grounded transformer less photovoltaic inverter with inherent active-power decoupling," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 7, pp. 5188-5201, Jul. 2017.
- [17] P. K. Achanta, B. B. Johnson, G. -S. Seo and D. Maksimovic, "A multilevel DC to three-phase AC architecture for photovoltaic power plants," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 181-190, Mar. 2019.
- [18] X. Li, L. Cheng, L. He, Z. Zhu, Y. Yang, and C. Wang, "Capacitor voltage ripple minimization of a modular three-phase AC/DC power electronics transformer with four-winding power channel," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 119594-119608, 2020.
- [19] W. Wen, K. Li, Z. Zhao, L. Yuan, G. Mo, and W. Cai, "Analysis and control of a four-port megawatt-level high-frequency-bus-based power electronic transformer," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 36, no. 11, pp. 13080-13095, Nov. 2021.
- [20] M. Feng, C. Gao, J. Xu, C. Zhao and G. Li, "Modeling for complex modular power electronic transformers using parallel computing," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 3, pp. 2639-2651, Mar. 2023.
- [21] S. Falcones, R. Ayyanar and X. Mao, "A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2192-2203, May 2013.
- [22] T. O. Olowu, H. Jafari, M. Moghaddami and A. I. Sarwat, "Multiphysics and multiobjective design optimization of high-frequency transformers for solid-state transformer applications," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 1014-1023, Jan.-Feb. 2021.
- [23] Y. Cai, et al., "Magnetic integration for a dual active bridge converter planar transformer with accurate leakage inductances estimation," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 112278-112289, 2024.
- [24] L. Zheng, et al., "7.2 kV Three-port SiC single-stage current-source solid-state transformer with 90 kV lightning protection," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 12080-12094, Oct. 2022.
- [25] Z. Zhao et al., "Design and Demonstration of a 100 kW High-Frequency Matrix Core Transformer for More Electric Aircraft Power Distribution," *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 4, pp. 4279-4290, Dec. 2022.

جدول ۳: مقایسه مربوط به سه ساختار پیشنهادی.

نام متغیر	توپولوژی اول	توپولوژی دوم	توپولوژی سوم
حذف توان اعوجاجی مرتبه دوم	ندارد	ندارد	دارد
پایداری نسبی در برابر بارهای نامتعادل	ندارد	دارد	دارد
پایداری نسبی در برابر خطای تکفاز در سمت LV	ندارد	دارد	دارد
پایداری نسبی در برابر خطای تکفاز در سمت MV	ندارد	ندارد	دارد

همچنین میزان پایداری نسبی در مواجهه با بارهای نامتعادل، خطای سمت LV و خطای سمت MV با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج این مقایسه در جدول ۳ ارائه شده است.

۶- نتیجه گیری

در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت مبتنی بر ساختار مدولار که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته‌اند، وجود توان اعوجاجی با فرکانس پایین در خازن‌های ماژول یک چالش قابل توجه بوده است که ظرفیت PET را برای افزایش چگالی توان محدود کرده است و به همین دلیل استفاده از آن برای کاربردهای با توان بالا، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقاله، سه ساختار پیشنهادی برای PET چندپورته با استفاده از مبدل‌های پنج سیم‌پیچه و با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی معرفی و مقایسه شده‌اند. این ساختارها با هدف کاهش چالش‌های مرتبط با کاهش توان اعوجاجی مرتبه دوم، کاهش حجم خازن‌های لینک DC و همچنین کاهش تعداد عناصر به کار رفته در مبدل طراحی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی در محیط MATLAB/Simulink نشان می‌دهد که توپولوژی سوم، با بهره‌گیری از ترکیب اتصال لینک‌های DC و توزیع ورودی‌های سمت MV، به‌طور قابل‌توجهی در مدیریت بارهای نامتعادل و بهبود پایداری سیستم موفق عمل کرده است. این ساختار نه تنها توانسته است چالش‌های مرتبط با نوسانات توان اعوجاجی فرکانس پایین را کاهش دهد، بلکه با افزایش مقاومت سیستم در برابر خطاهای تکفاز در سمت LV و MV، عملکرد پایداری نسبت به توپولوژی‌های قبلی ارائه کرده است.

مراجع

- [1] X. She, A. Q. Huang and R. Burgos, "Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 186-198, Sept. 2013.
- [2] J. E. Huber and J. W. Kolar, "Solid-state transformers: On the origins and evolution of key concepts," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 19-28, Sept. 2016.
- [3] A. Q. Huang, "Medium-voltage solid-state transformer: Technology for a smarter and resilient grid," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 29-42, Oct. 2016.
- [4] S. Madhusoodhanan et al., "Solid-state transformer and MV grid tie applications enabled by 15 kV SiC IGBTs and 10 kV SiC MOSFETs based multilevel converters," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 51, no. 4, pp. 3343-3360, Sept. 2015.
- [5] X. Wang, J. Liu, S. Ouyang, T. Xu, F. Meng and S. Song, "Control and Experiment of an H-Bridge-Based Three-Phase Three-Stage Modular Power Electronic Transformer," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp. 2002-2011, Ma. 2016.
- [6] C. Gu, Z. Zheng, L. Xu, K. Wang and Y. Li, "Modeling and control of a multiport power electronic transformer (PET) for electric

مهدی سرادرزاده در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۱ در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق از دانشگاه تهران فارغ التحصیل شده است و اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان عبارتند از: مبدل‌های الکترونیک قدرت، پردازش انرژی فتوولتائیک، کاربرد الکترونیک قدرت در سیستم، مبدل‌های توان بالا، انتقال بی‌سیم توان، مبدل‌های شارژرهای خودرو، درایوها و کنترل پیشرفته موتورهای الکتریکی.

حمید کاوش تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۲ از دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول به پایان رسانده است. تمرکز تحقیقاتی پایان‌نامه ایشان در دوره کارشناسی ارشد بر طراحی و کنترل مبدل‌های چند پورته با کاربرد در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت بوده است. ایشان در حال حاضر در تیم تحقیقاتی الکترونیک قدرت دانشگاه صنعتی جندی شاپور مشغول به فعالیت است.